

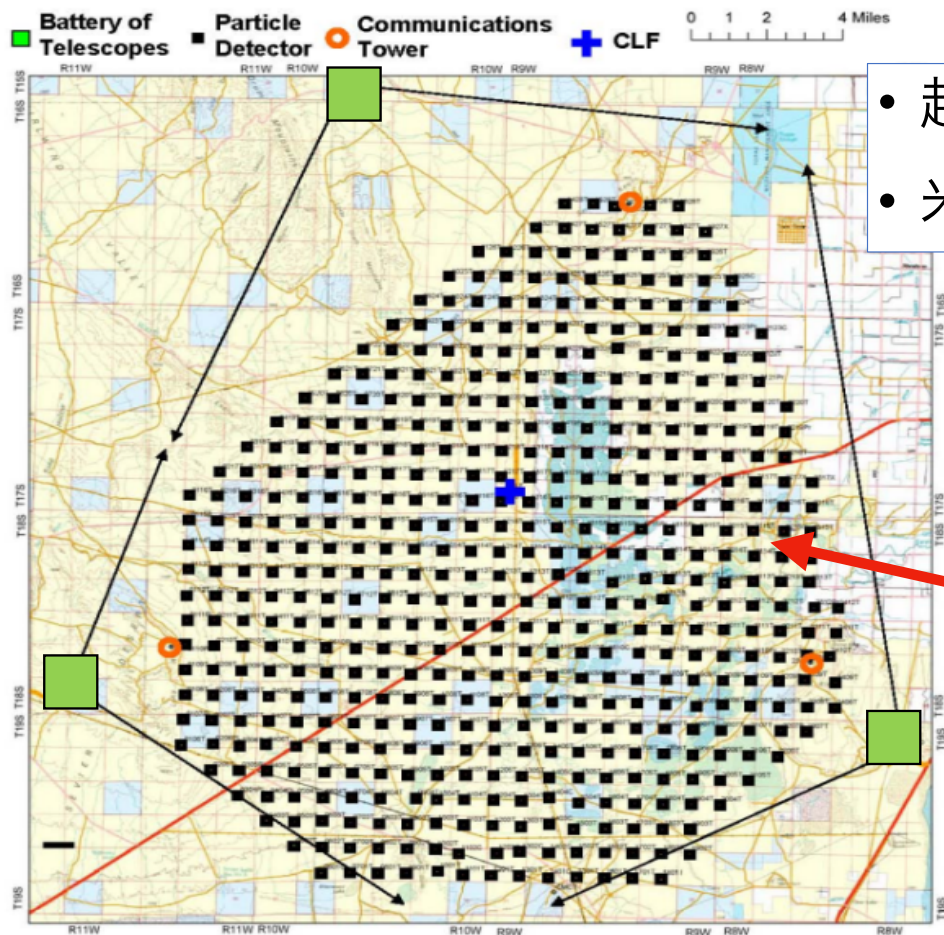
# Even-Odd法を用いた TASD事象毎の到来方向決定精度の 見積もり手法の検討

2024年3月26日

第7回 空気シャワー研究会

大阪電気通信大学 中山侑哉

# テレスコープアレイ実験 (TA実験)



- 超高エネルギー宇宙線を対象とした観測実験
- 米国ユタ州の砂漠地帯に検出器を設置

## ■ 地表粒子検出器 (SD)



■ : 大気蛍光望遠鏡

- 1.2 kmの間隔で507台の地表粒子検出器 (SD)を設置、総検出面積は700 km<sup>2</sup>

# 空気シャワーイベントの再構成

SDが検出した信号から宇宙線空気シャワーのデータを再構成する  
再構成によって、到来方向やエネルギーを推定する

## ①Geometry Fitting

各SDから得られる到来時刻の差から  
到来方向を決定する

## ②LDF Fitting

空気シャワーの広がりからエネルギー  
を決定する



天頂角 $\theta$  と 方位角 $\varphi$  が得られる

- この2つのパラメータから以下のような3次元単位ベクトルを考え、宇宙線の到来方向を表す

$$\hat{\mathbf{n}}(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} -\sin\theta\cos\varphi \\ -\sin\theta\sin\varphi \\ -\cos\theta \end{pmatrix}$$

# 目的

## 到来方向の決定精度をシミュレーションを用いずに見積もる

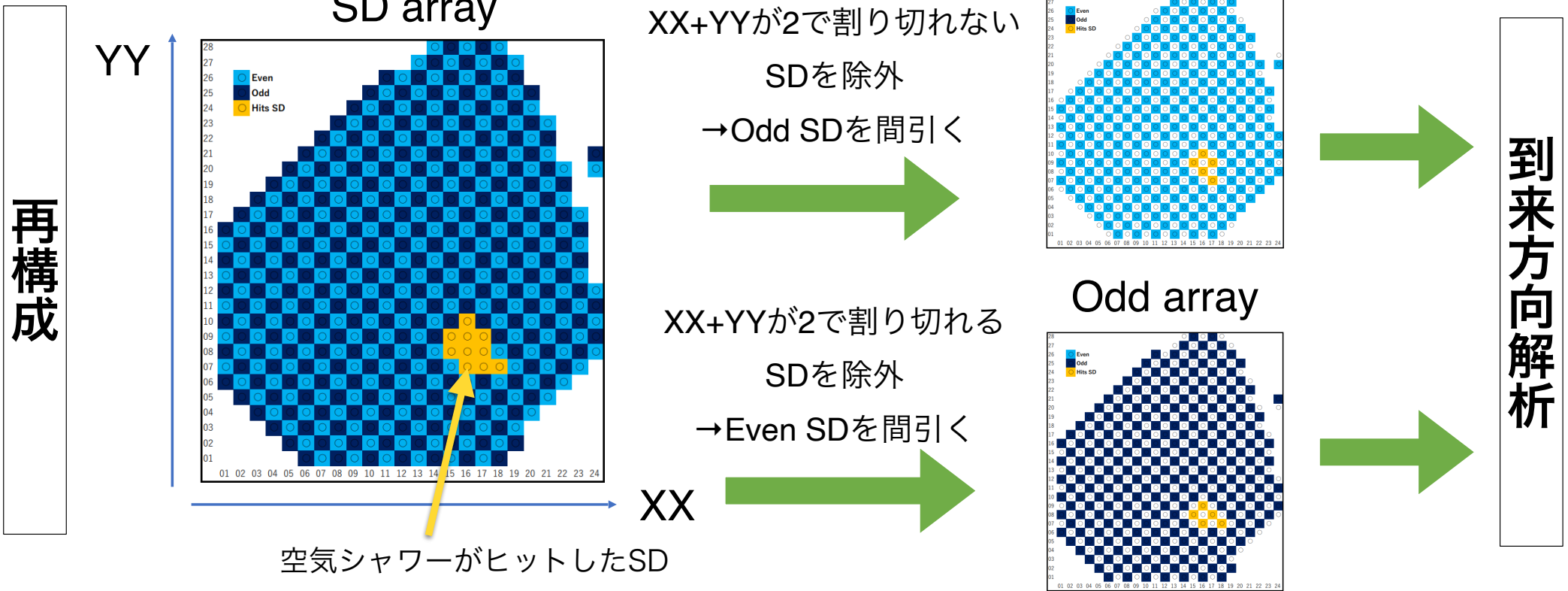
- 従来の宇宙線の到来方向の決定精度は、シミュレーションと再構成から決定精度を見積もっていた。
- 本研究では、シミュレーションを用いず、実データから決定精度を見積もるための新たな再構成手法を検討した。

## シミュレーションを使わないことによるメリット

- 実データのみを用いた解析では、シミュレーションと異なり、1イベントに対しての決定精度を求めることができる。
- つまり、観測統計量が少ない最高エネルギー宇宙線に対しても到来方向決定精度を求めることができる。

# Even-Odd法におけるSD選別条件

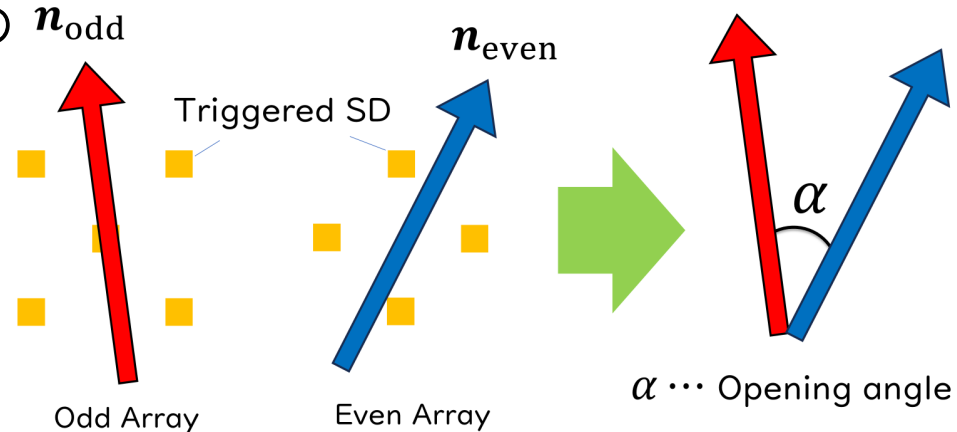
Even-Odd法：再構成の際、偶数番目と奇数番目の2つに分けて、それぞれのSDアレイで到来方向解析を行う手法



# 決定精度の評価方法

## 決定精度の評価には、Opening Angleを用いた

- Opening Angleの分布から求められる標準偏差の  $n_{\text{odd}}$   $\frac{1}{2}$  を決定精度とした
- シミュレーションの到来方向の決定精度： $1.5^\circ$   
(Abu-Zayyad 2012 ApJ Anisotropy より)
- 今回は空気シャワーイベントに対してイベントセレクションを行っていないため、シミュレーションの結果は参考程度



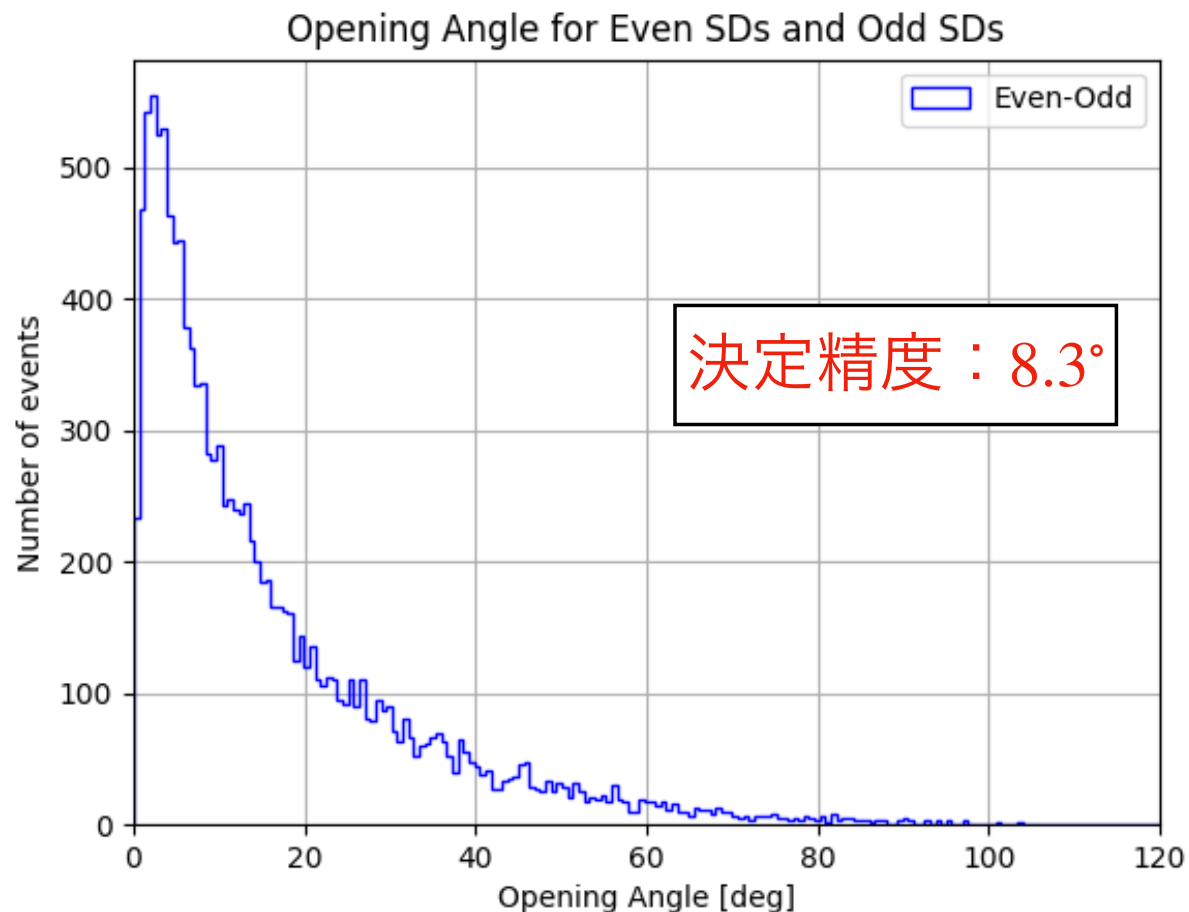
$$\alpha = \arccos(\hat{\mathbf{n}}_{\text{even}} \cdot \hat{\mathbf{n}}_{\text{odd}})$$

Even-Odd再構成手法からOpeningAngleを求め、統計的な決定精度を見積った。

# Even-Odd再構成手法を用いたときの解析結果

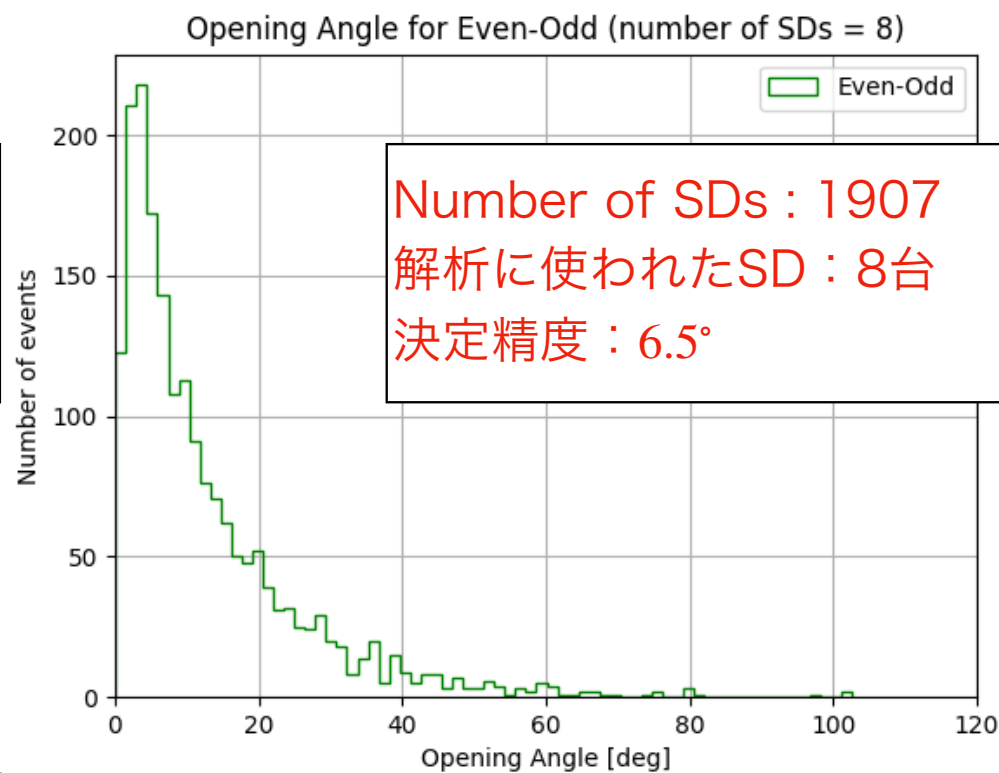
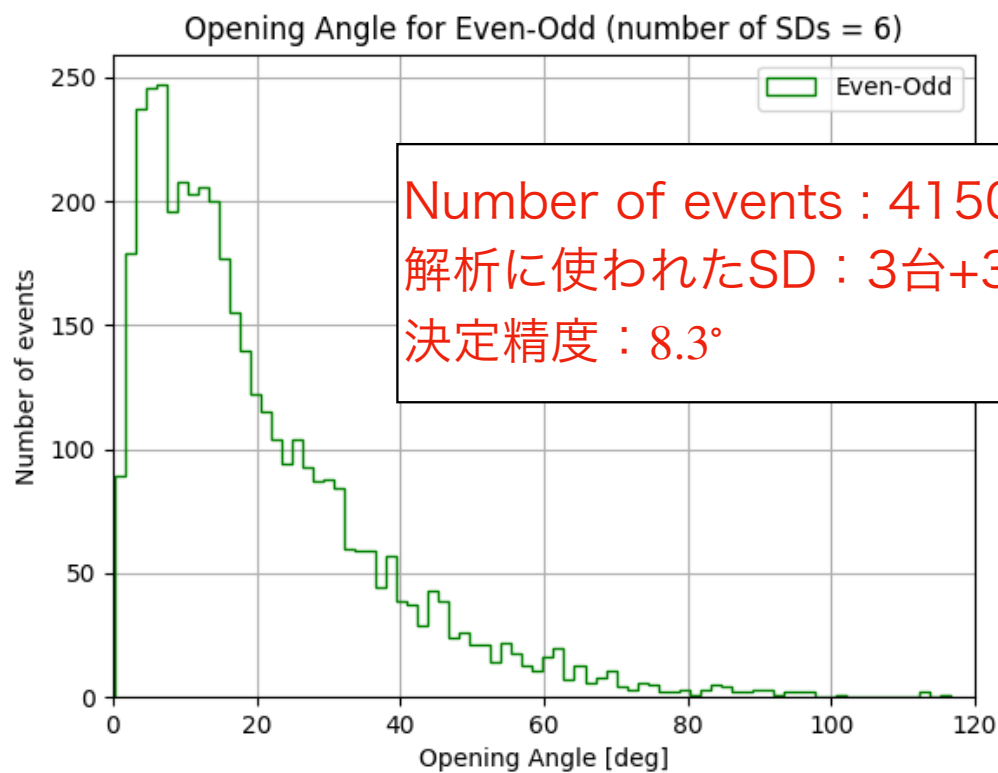
## 解析データ

- 2016年 1月1日 - 12月31日
- 総イベント数：13155
- イベントがヒットしたSDの台数 … 合計6台
  - Even array：3台以上
  - Odd array：3台以上



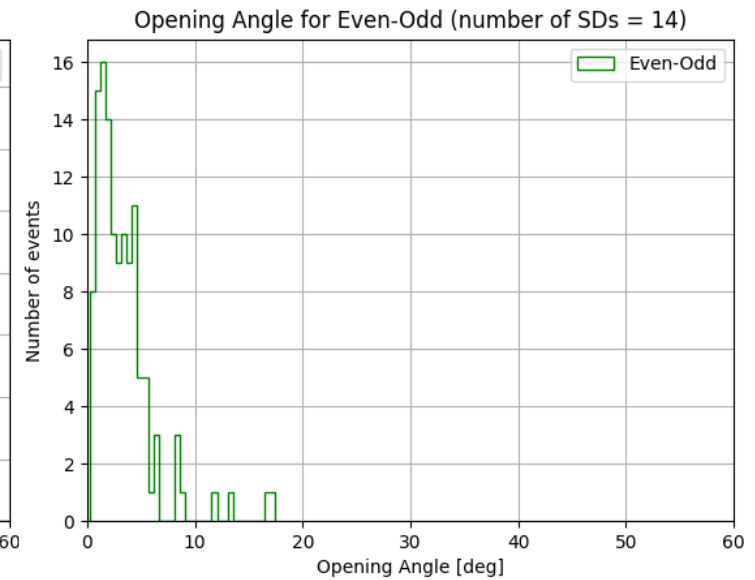
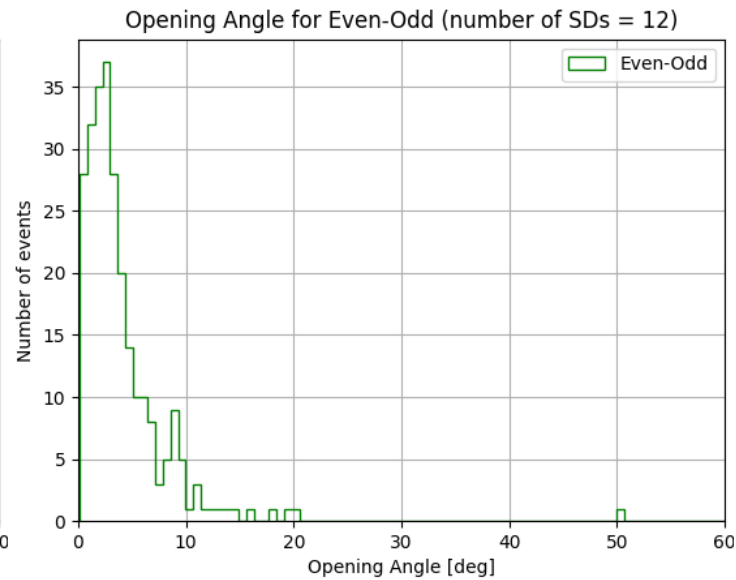
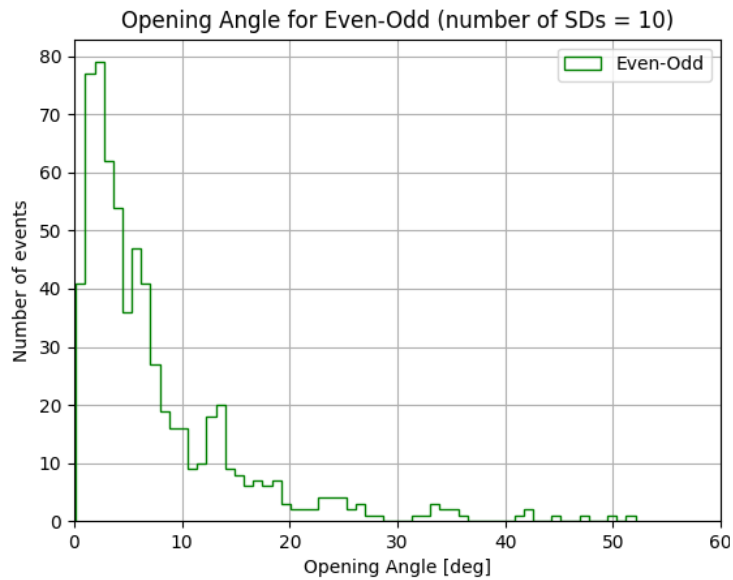
# SDの台数とOpeningAngleの関係

- 解析に使われるSDの台数によって、どれくらい決定精度が変わるかを検証した
- 解析期間は同様の2016年の1年間分





# SDの台数とOpeningAngleの関係



Number of events : 660  
解析に使われたSD : 10台  
決定精度 : 3.8°

Number of events : 259  
解析に使われたSD : 12台  
決定精度 : 3.0°

Number of events : 124  
解析に使われたSD : 14台  
決定精度 : 1.4°

# まとめと今後

## まとめ

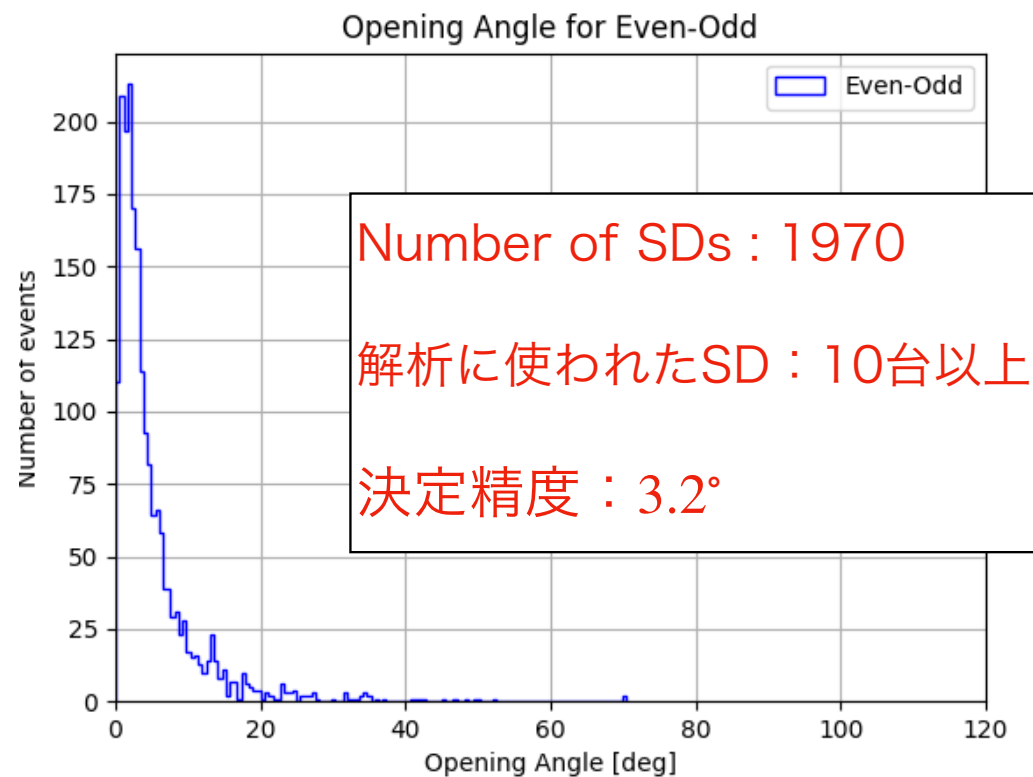
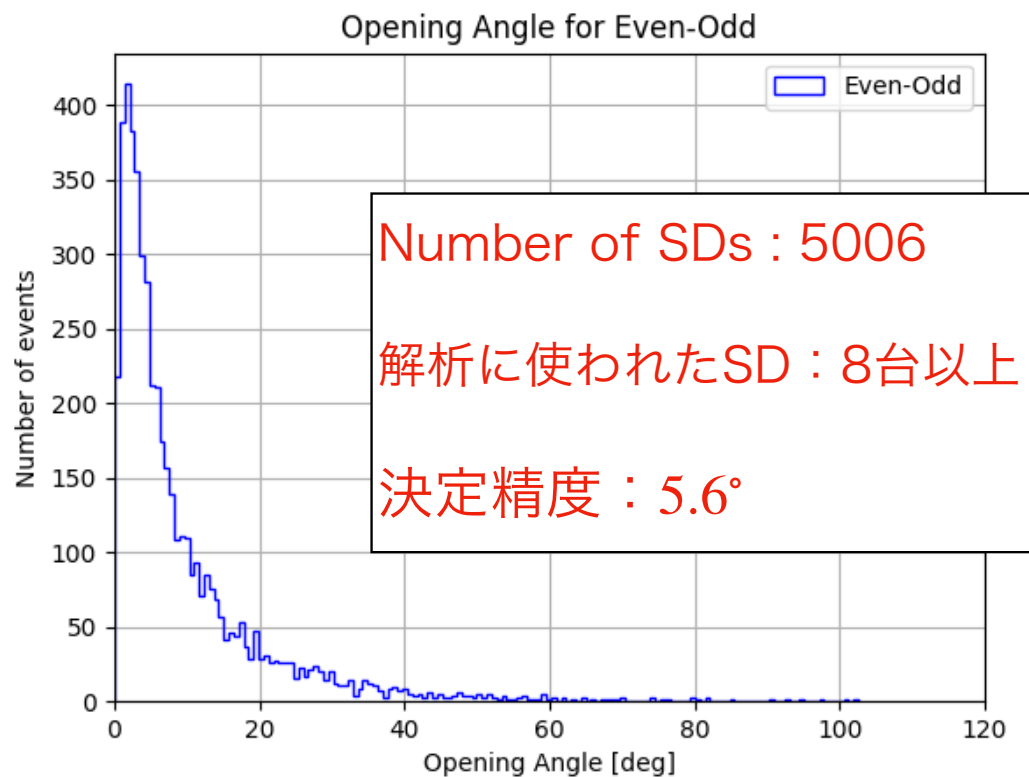
Even-Odd再構成手法を用いて、SDデータ1年分の解析を行った結果、Opening Angleの決定精度は $8.3^\circ$ であった。SDの台数に条件を加えると、解析に使われるSDの台数が多いほどOpening Angleの決定精度が高くなり、14台では $1.4^\circ$ という結果になった。

## 今後

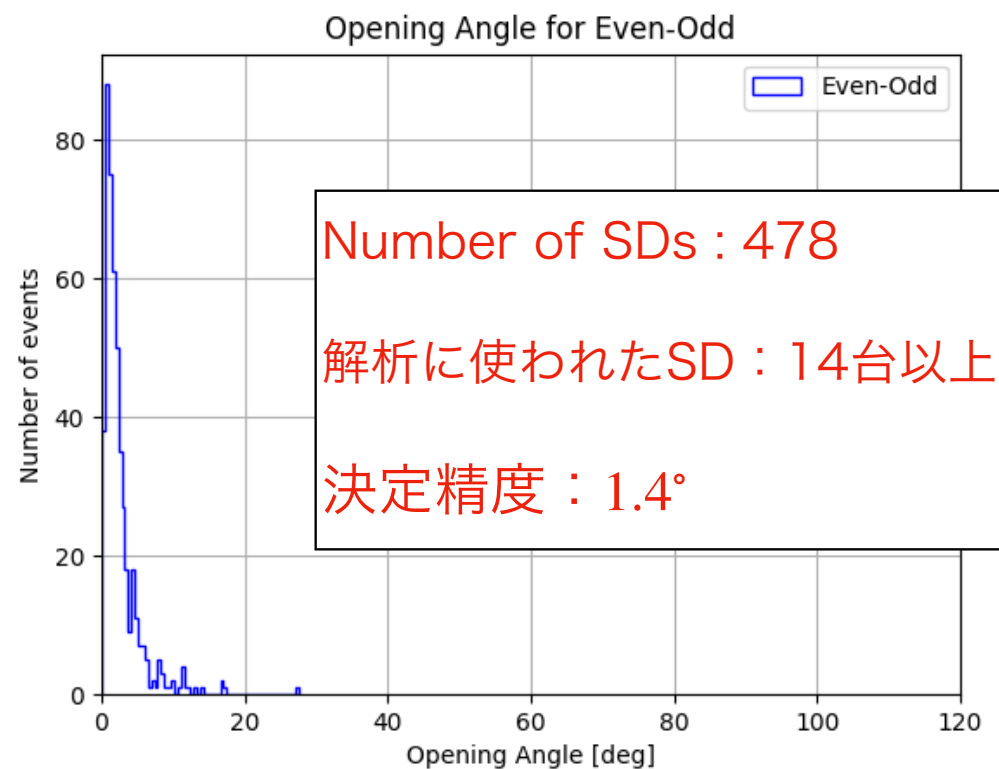
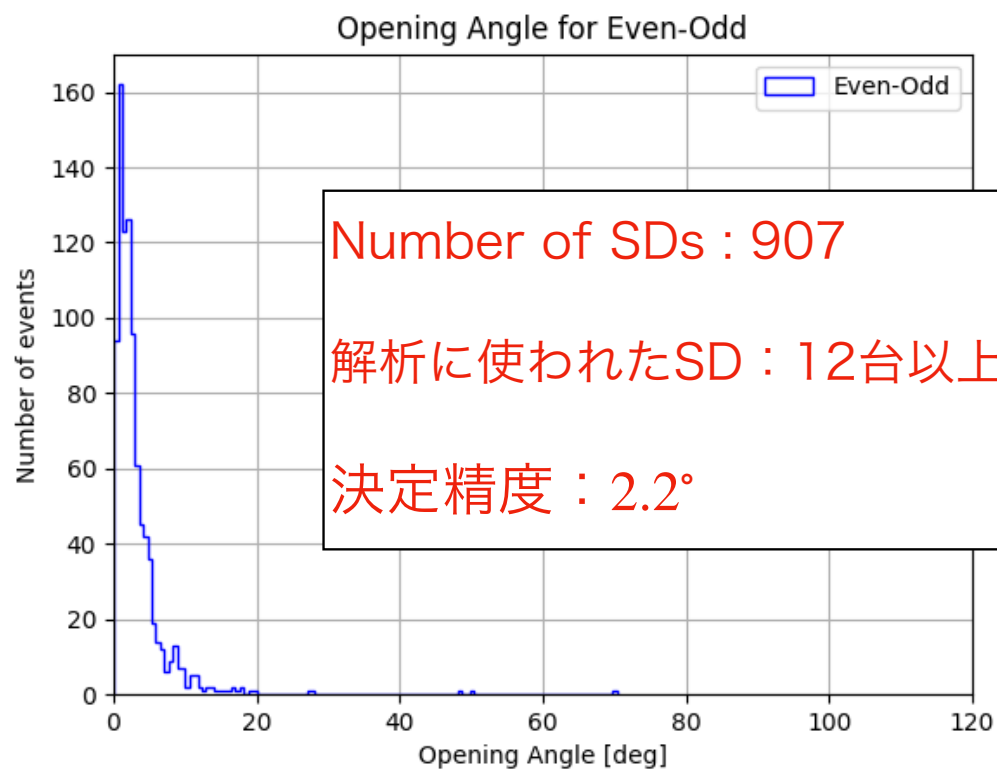
- 台数が10台の時は、5台+5台 or 4台+6台 or 3台+7台で決定精度に違いがあるか調べる
- 解析期間を増やし、イベントセレクションを行った上で、決定精度の検証を行い、シミュレーションの結果と比較する
- エネルギーの高い1イベントに対して決定精度を見積もる
- 赤経赤緯に変換をして赤道座標系マップを描き、イベント毎に決定精度を表す

**BACK UP**

# SD台数条件を加えたときのOpening Angle



# SD台数条件を加えたときのOpening Angle



# 宇宙線の観測

## 地上観測の場合

起源天体などから宇宙線が地球に飛んでくる

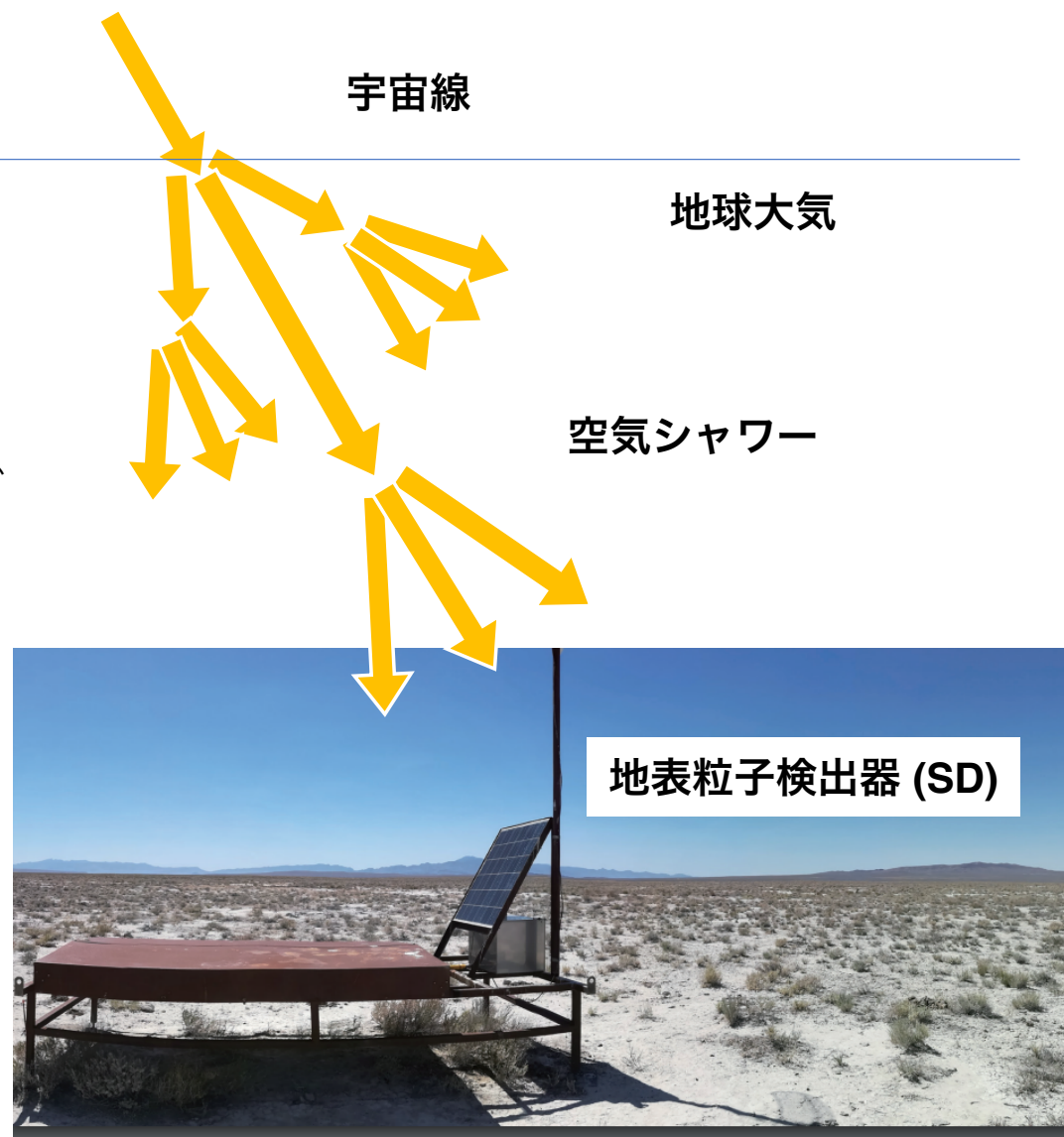
- 低エネルギー → 大気に吸収される
- 高エネルギー → 空気シャワー現象を起こして地上に降り注ぐ

## 空気シャワー現象

大気中の窒素原子と相互作用を起こし、大量の2次粒子群(空気シャワー)を生成する

## 地表粒子検出器 (SD, Surface Detector)

- SDの大きさは3平米
- 空気シャワーに含まれる荷電粒子を検出する
- シンチレータ内部で起こる励起現象から蛍光を検出する。昼夜問わず観測可能



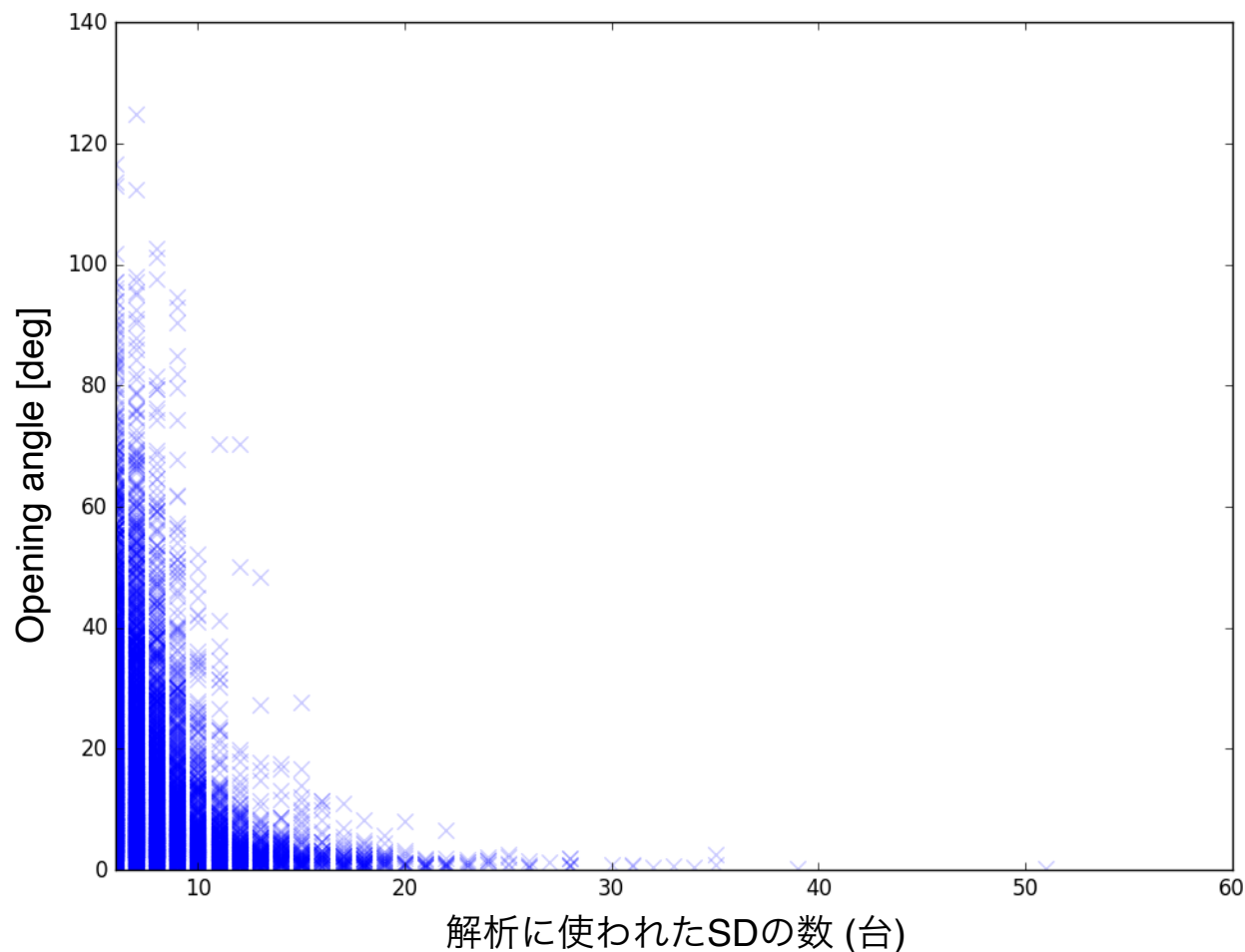
# Opening AngleとSD台数の関係

解析に使われているSDの台数が  
Opening Angleにどれだけ影響を  
与えているか調べた

解析に使われるSDの数(Even-Odd  
の場合)

- Min: 6台 Max: 51台

解析に使われた台数が多いほど決定  
精度が小さくなる



# 決定精度の評価方法

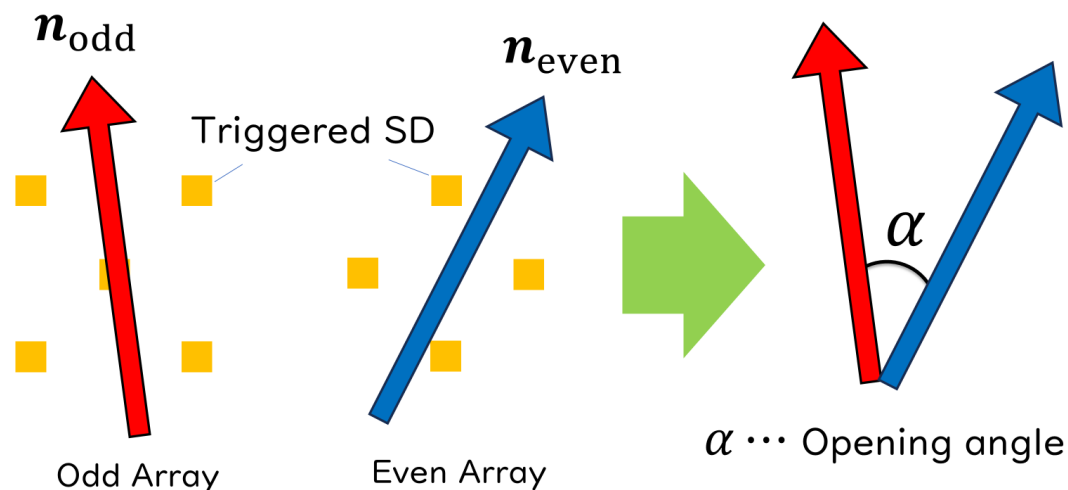
2方向の誤差がどれだけあるかを見積もるために、離角(Opening angle)を利用

- 離角 (Opening angle) の分布から求められる標準偏差の  $\frac{1}{2}$  を決定精度とする

- 従来のシミュレーションを使った場合の決定精度：  $1.5^\circ$

- 離角の分布は正規分布に従う

- $\alpha = \arccos^{-1}(\mathbf{n}_{\text{even}} \cdot \mathbf{n}_{\text{odd}})$





# シミュレーションに対する誤差の違い

- シミュレーションでは、空気シャワーそのものを生成するため、宇宙線の到来方向は真である。
- Even-Odd再構成手法では、真の宇宙線の到来方向を決めているわけではないため、そのシミュレーションを用いた場合と比べて、誤差は2倍になる。
- Even-Oddの誤差を $\alpha$ 、シミュレーションを用いた場合の誤差を $\beta$ とすると、到来方向の誤差 $\sqrt{2}$ 倍 $\times$ 検出器の台数が2分の1になっているため誤差 $\sqrt{2}$ 倍で2倍となる